



ساخت و آزمایش یک توربین بادی محوری با بیشترین توانایی در جذب انرژی جنبشی جریان

منوچهر راد^۱، علی زاهدی نژاد^{۲*}

^۱دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۲دانشکده مهندسی مکانیک و هوا-فضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۴ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

ترمز مکانیکی
توربین بادی محوری
روتور دو پروانه‌ای
ضریب توان بهینه

چکیده: هدف از مقاله حاضر ساخت و آزمایش یک توربین بادی محوری با ضریب توان بالاتر از ۵۵٪ است. چرا که این ضریب توان بالاترین مقدار در جدیدترین نمونه‌های توربین‌های محوری ساخته شده است. بررسی حاضر منجر به ساخت طرحی جدید از یک توربین بادی کوچک شده که در اندازه‌گیری‌های تجربی حداکثر ضریب توان ۶۸ الی ۸۰ درصد را نشان داده است. اندازه‌گیری ضریب توان روتور دوپروانه‌ای توربین بادی با نتایج تئوری دو دیسک انتقال توان، که دست‌یابی به ضریب توان در حد ۶۴ درصد را اثبات کرده، هم‌خوانی دارد. روتور توربین بادی شامل یک پروانه محوری سه پره‌ای و یک پروانه ترکیبی شش پره‌ای بهینه‌سازی شده است. قطعات توربین بادی با تکنولوژی چاپ سه‌بعدی ساخته شده‌اند. یک فن محوری بزرگ به صورت افقی نصب شده است تا جریان باد را ایجاد کند. روی محور روتور یک ترمز مکانیکی کوچک نصب شده است و برای ایجاد گشتاور ترمزی ثابت قابل تنظیم است. نیروی پسای روتور با استفاده از نیروسنج نوع اس که درون یک سازه ایرودینامیکی جاسازی شده، اندازه‌گیری شده است. توربین بادی کوچک ضریب توان بهینه خود را در جریان باد کم‌سرعت (در محدوده ۱ تا ۳ متر بر ثانیه) حفظ کرده است. آزمایش برای روتور توربین و برای توربین بادی دارای جدار و بازوهای تکیه‌گاهی انجام شده و نتایج تقریباً یکسان به دست آمده است.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعات گسترده و پروژه‌های تحقیقاتی متعددی توسط محققان در زمینه توربین‌های بادی انجام شده است. مطالعه گسترده بلوکن [۱] در سال ۲۰۱۴ شامل مروری بر دستاوردهای زمینه مهندسی محاسباتی باد^۱ در پنجاه سال گذشته است. در مدت پنجاه سال گذشته، مهندسی محاسباتی باد در زمینه‌های تحقیقاتی، اجرایی و آموزشی پیشرفت چشم‌گیری داشته است. در سال ۲۰۱۵ روشن و همکاران [۲] هندسه پله‌ای را برای داکت توربین بادی به کار بردند. آن‌ها تأثیرات هندسه پله‌ای در داکت توربین بادی محوری را به صورت عددی بررسی کردند. در چند سال اخیر راد و همکاران [۳-۵] آزمایش‌های متعددی در زمینه افزایش جذب توان توسط توربین‌های آبی و بادی محوری انجام دادند. آن‌ها با بررسی‌های عددی و تجربی گسترده، شکل داکت توربین‌های انرژی جنبشی محوری را بهینه‌سازی کردند. در سال ۲۰۱۶ تحقیقات گسترده و جدیدتری در زمینه تحلیل توربین‌های بادی انجام شد. لی و همکاران [۶] یک روش بهینه‌سازی جدید برای بهبود عملکرد کلی توربین بادی با ایرفویل ضخیم ارائه کردند. هدف آن‌ها افزایش قدرت سازه توربین بادی بود. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک^۲ برای بهینه‌سازی ایرفویل استفاده کردند. آن‌ها با ۳۵

درصد افزایش ضخامت ایرفویل، شرایط توقف جریان^۳ و پارامترهای پایداری جریان را بررسی کردند. در سال ۲۰۱۶ بلامدی و همکاران [۷] مشخصه‌های ایرودینامیکی توربین بادی دارای مجاری^۴ هوا درون پره‌ها را تحت شرایط توقف جریان بررسی کردند. آن‌ها از تحلیل‌های عددی دو بعدی برای تعیین موقعیت مجاری استفاده کردند. آن‌ها به کمک شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی جریان نشان دادند که در یک محدوده مشخص از زاویه حمله، عملکرد ایرودینامیکی پروانه توربین بادی بهتر می‌شود. در سال ۲۰۱۶ حسن‌زاده و همکاران [۸] توزیع طول وتر و زاویه پیچش را برای یک توربین بادی کوچک بهینه‌سازی کردند. هدف آن‌ها افزایش جذب انرژی توربین‌های بادی افقی-محور بود. آن‌ها نتایج خود را با مدل‌های ریاضی گوناگون مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که با بهینه‌سازی پارامترهای یک نمونه توربین بادی ساخته شده، سالانه ۸/۵ درصد انرژی بیشتر حاصل می‌شود. در سال ۲۰۱۶ بای و ونگ [۹] تاریخچه‌ی روش‌های تجربی و محاسباتی که در تحلیل توربین‌های بادی افقی-محور استفاده شدند را ارائه کردند. در سال ۲۰۱۶ گیاهی و همکاران [۱۰] تأثیر ابعاد توربین بادی بر مشخصه‌های ایرودینامیکی آن بررسی کردند. آن‌ها نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. در سال ۲۰۱۶ ونگ و همکاران [۱۱] یک مدل ایرو-الاستیک^۵ برای برهم‌کنش پره توربین بادی افقی-محور با جریان باد

3 Stall
4 Slots
5 Aeroelastic

1 Computational wind engineering
2 Genetic algorithm

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.zahedinejad@srbiau.ac.ir

- قطر محور مرکزی
 - انحنا و شکل هیدروفویل در سطح پره‌ها
 - توزیع زاویه گام در راستای شعاعی
 - مختصات نقطه شروع برای موقعیت لبه جلویی هیدروفویل سطح مقطع پره
 - طول وتر پره‌ها در هر شعاع از پروانه توربین بادی
 - توزیع ضخامت هیدروفویل در سطح مقطع پره در راستای شعاعی
- در نتیجه ضریب توان هر پروانه به صورت مستقل افزایش یافته است.

۲-۲- طراحی روتور توربین بادی

روتور توربین بادی در شکل‌های ۱ و ۳ ترسیم شده است. قطر پروانه‌ها ۷/۵ سانتی‌متر است. دو طرح روتور مستقل (شکل ۱) و روتور توربین بادی (شکل ۳) طراحی و ساخته شده است. روتور توربین بادی برای ایجاد حرکت دورانی پرسرعت طراحی شده است. خصوصیات جرمی و دینامیکی پروانه‌ها در طراحی روتور مهم هستند. در هر دو طرح روتور از اجزای مکانیکی برای هم‌محور شدن پروانه‌ها و به منظور انتقال قدرت استفاده شده است.

۲-۲-۱- سرعت‌های جریان در پروانه و مثلث سرعت‌ها

با در نظر گرفتن مفهوم حداکثر نیروی برآ در هر سطح مقطع، زاویه حمله ایده آل و زاویه گام بهینه مستقیماً با زاویه ورود جریان مرتبط می‌شوند. برای یک هیدروفویل در شعاع r زاویه حمله بهینه $\alpha_{opt} = \alpha_0$ (یا زاویه حمله ایده‌آل) بیشترین نیروی برآ را ایجاد می‌نماید. با فرض کوچک بودن توزیع سرعت القایی، زاویه گام بهینه با بیشترین گشتاور پروانه از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$\theta_{(r),opt} = \beta_{(r)} + \alpha_{opt} = \tan^{-1}(\lambda_{(r)}) + \alpha_0 \quad (1)$$

۲-۲-۳- طراحی بدنه و بازوهای تکیه‌گاهی توربین بادی

توربین بادی با داشتن بدنه‌ای که در شکل ۴ (الف) ترسیم شده می‌تواند چندین مزیت را ایجاد کند:

- بازوهای نگه‌دارنده توسط بدنه نگه داشته می‌شوند و نیروی وزن روتور توربین و نیروهای دینامیکی و آیرودینامیکی روی بدنه توزین می‌شوند.
 - بدنه توربین بادی به نصب تجهیزات توربین یا ابزارهای آزمایشی کمک می‌کند.
- بازوهای تکیه‌گاهی، یاتاقان‌های روتور توربین را به صورت هم‌محور نگه می‌دارند. این بازوها شکل آیرودینامیکی دارند و ضخامت آن‌ها بهینه‌سازی شده است. بازوهای تکیه‌گاهی خصوصیات مهم زیر را دارند:
- در ابعاد طراحی شده، بیشترین مقاومت سازه را ایجاد می‌نمایند.
 - ارتعاش روتور را جذب و آن را میرا می‌کنند.

ارائه کردند. مدل آن‌ها بر اساس حل توأم دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل المان محدود است. لی و همکاران [۱۲] با اندازه‌گیری‌های تجربی در تونل باد، تأثیر زاویه گام بهینه پره توربین را در مقابل تأثیرات آشفتگی جریان بررسی کردند. هدف اصلی آن‌ها بررسی مشخصه دنباله آشفته جریان در توربین‌های بادی افقی-محور بود.

مقاله حاضر مراحل طراحی، ساخت و آزمایش یک توربین محوری را شرح می‌دهد. توربین ابداع شده در جریان باد با ضریب توان بالاتر از جدیدترین نمونه‌های ساخته شده، انرژی جنبشی جریان سیال را جذب می‌کند. بر اساس روش‌های عددی و تعداد زیادی آزمایش در جریان باد، ضریب توان نمونه بهینه‌سازی شده توربین بین ۶۴ تا ۸۰ درصد است. روتور توربین شامل یک پروانه محوری سه-پره‌ای و یک پروانه ترکیبی شش-پره‌ای است. سازه نگه‌دارنده روتور در مقابل بارهای ارتعاشاتی بسیار مقاوم است. سازه توربین به نحوی طراحی شده که افت راندمان توربین در برهم‌کنش سازه و سیال حداقل است. مرکز جرم توربین در فاصله مشخصی در میان بازوهای نگه‌دارنده روتور قرار گرفته تا بهترین تعادل استاتیکی برای مهار نیروی وزن توربین حاصل شود. این توربین محوری در جریان باد قادر است ۱۰ تا ۲۵ درصد انرژی بیشتری را نسبت به جدیدترین نمونه‌های ساخته شده جذب نماید. علاوه بر آن، امکان افزایش توان استخراج شده با کاربرد روش تقویت دیفیوزری وجود دارد. ضریب توان توربین محوری ابداع شده بدون نیاز به تغییر پارامترهای هندسی با افزایش ابعاد توربین، به صورت تدریجی افزایش می‌یابد.

۲-۲- مراحل طراحی توربین بادی محوری

طراحی توربین بادی که در شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده، در چند مرحله انجام شده است. ابتدا پروانه‌ها طراحی شدند، سپس بر اساس پروانه‌ها روتور توربین بادی طراحی شده است و در مرحله بعد جدار توربین و بازوهای تکیه‌گاهی طراحی و ساخته شدند.

۲-۱- طراحی و بهینه‌سازی پروانه‌های توربین بادی

طراحی دو پروانه محوری سه پره‌ای و شش پره‌ای که در شکل ۱ نمایش داده شدند در چند مرحله انجام شده است. طراحی و بهینه‌سازی اولیه با استفاده از محیط برنامه نویسی نرم افزار متلب^۱ انجام شده است. برای طراحی دو پروانه محوری از تئوری شبکه گردابه^۲ با در نظر گرفتن اثرات سرعت القایی جریان استفاده شده است. پس از ایجاد طرح نرم‌افزاری CAD، طراحی پارامتری هندسه پروانه‌ها به کمک نرم‌افزار سالیدورک^۳ انجام شده است. هر یک از پارامترهای هندسی پروانه، با روش شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و تصحیح شده است. در این مرحله پروانه‌های سه پره‌ای و شش پره‌ای در موارد زیر بهینه‌سازی شدند:

- 1 MATLAB
- 2 Vortex lattice lifting line theory
- 3 SolidWorks Flow Simulation

است. سطح خارجی و سطح داخلی بدنه اتصال به تکیه گاه با چسب اپوکسی تقویت شده است. این تکیه گاه برای حفظ راستای محوری، از استحکام کافی برخوردار است.

سطح مقطع ترمز دیسکی در شکل ۲ ترسیم شده است. ترمز دیسکی از مونتاژ یاتاقان‌های ساچمه‌ای حاصل شده است. یاتاقان‌های با قطر ۸ میلی‌متر در داخل یاتاقان‌های با قطر ۱۶ میلی‌متر جا زده شدند. یک لایه چسب مایع نفوذکننده در سطح خارجی یاتاقان‌ها تزریق شده است. با این روش استحکام سازه ترمز دیسکی افزایش یافته است. درون ترمز دیسکی یک صفحه اصطکاکی بسیار کوچک قرار دارد که از جنس پلاستیک فشرده است. نیروی محوری ثابت از طریق یک پیچ موازی با محور روتور تنظیم می‌شود. پیچ‌های تثبیت می‌توانند پیچ تنظیم گشتاور را در موقعیت تنظیم شده ثابت نگه دارند. گشتاور ثابت ترمزی توسط نیروی ثابت محوری ایجاد می‌شود. فنر بازگرداننده امکان بازگشت محور ثابت را فراهم می‌سازد تا نیروی محوری به صورت تدریجی افزایش یابد و تنظیم تکرارپذیر باشد.

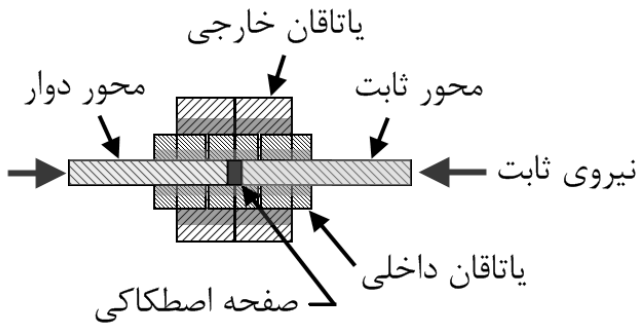


Fig. 2. Components of disc brake for adjusting constant torque on rotor axis
شکل ۲: اجزای ترمز دیسکی برای تنظیم گشتاور ثابت در محور روتور

با در نظر گرفتن سرعت دورانی بسیار بالا (در محدوده‌ی ۳۰۰۰ rpm تا ۹۰۰۰ rpm) بالانس دینامیکی روتور قبل از آزمایش بسیار مهم است. پیچ‌های اتصال پروانه به محور (که در شکل‌های ۱ و ۳ مشخص شدند) قابلیت تنظیم راستای پروانه را فراهم می‌سازند. این پیچ‌ها از چرخش پروانه نسبت به محور دوار جلوگیری می‌کنند. در شکل ۳ یک مقطع برش خورده از روتور نمایش داده شده است تا ساختار اتصال پروانه به محور دوار مشخص گردد.

۴- ساخت توربین بادی در ابعاد کوچک

ساخت توربین بادی شامل ساخت روتور و ساخت بدنه توربین بادی است. توربین بادی توسط تجهیزات الکتریکی و مکانیکی تجهیز شده است. یک ترمز مکانیکی مینیاتوری برای تنظیم گشتاور ثابت در محور روتور ساخته و نصب شده است.

۴-۱- ساخت بدنه توربین بادی

بدنه توربین بادی در شکل ۴ نشان داده شده است. بدنه توربین بادی از

- شکل مناسب آیرودینامیکی دارند و اثرات سرعت القایی آن‌ها بر پروانه‌های توربین بادی کم است.

۲-۴- محدودیت‌های طراحی توربین بادی

در این تحقیق، مقاومت سازه بدنه و پروانه‌ها، هزینه ساخت و قابلیت آزمایش در تونل کاویتاسیون با سطح مقطع کوچک، محدودیت‌های اصلی طراحی توربین بودند [۱۳]. همچنین دقت در طراحی لبه‌های پستی پروانه‌ها که ضخامت کمی دارند در نظر گرفته شده است. لزوم استحکام پره‌ها در مقابل فشار جریان باعث شده از پره‌های با سطح مقطع ضخیم استفاده شود.

۳- ساخت روتور مستقل توربین بادی

روتور مستقل توربین بادی می‌تواند بدون جدار و بازوهای تکیه‌گاهی مانند یک توربین بادی کار کند. هدف از ساخت یک روتور محوری مستقل، اندازه‌گیری نیروی فشاری است که در جریان باد بر روتور به تنهایی وارد می‌شود. این روتور مستقیماً با محور نیروسنج نوع اس^۱ هم راستا می‌شود. در نتیجه هرگونه گشتاور اضافی یا نیروی پسای اضافی حذف می‌شود.

۳-۱- ساخت روتور محوری توربین بادی و ترمز دیسکی قابل تنظیم

شکل ۱ اجزای روتور مستقل توربین بادی را نشان می‌دهد. روتور توربین بادی شامل دو پروانه محوری است که روی یک محور نصب شدند. مواد پلاستیکی سبک وزن پی. ال. آ. برای ساخت پروانه‌ها استفاده شده است. روی پروانه‌ها یک لایه رنگ تزریق شده است تا هرگونه ناصافی در سطوح حذف شود. سپس روی سطوح خارجی پروانه‌ها یک لایه اسپری پلاستیک تزریق شده تا اصطکاک به حداقل برسد. با این روش پره‌ها در مقابل ضربات احتمالی در سرعت دوران بالا یا در اثر برخورد قطعات در زمان نصب، محافظت می‌شوند.

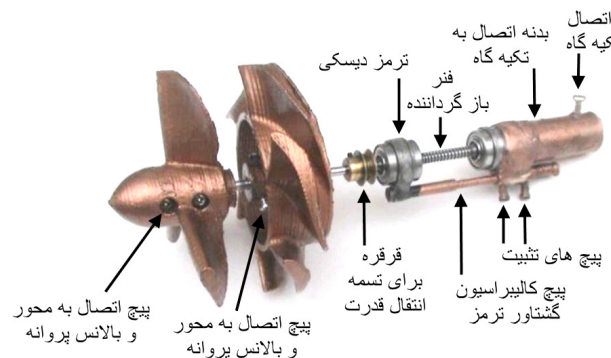


Fig. 1. Components of independent rotor of wind turbine
شکل ۱: اجزای روتور مستقل توربین بادی

بدنه اتصال به تکیه گاه یک پوسته‌ی استوانه‌ای به ضخامت ۲ میلی‌متر

- 1 S-type load cell
- 2 PLA

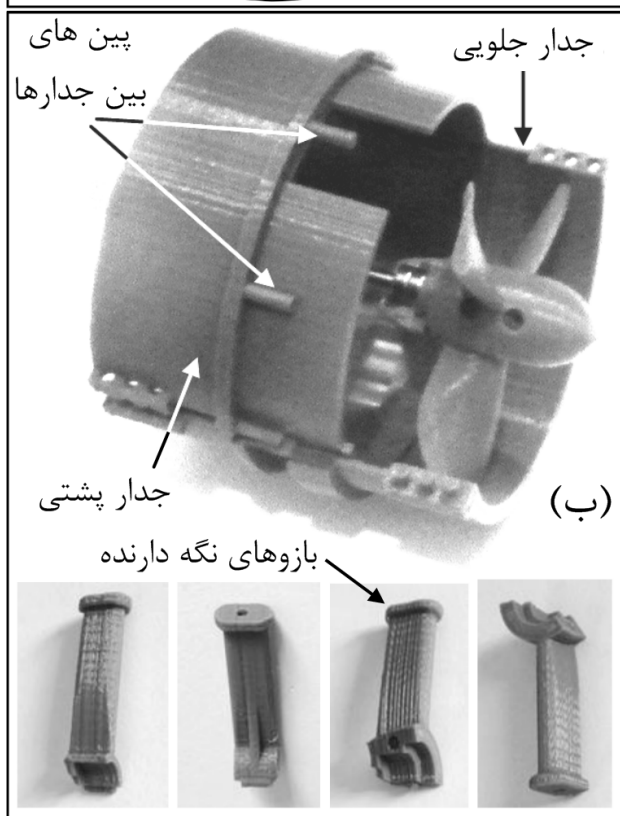
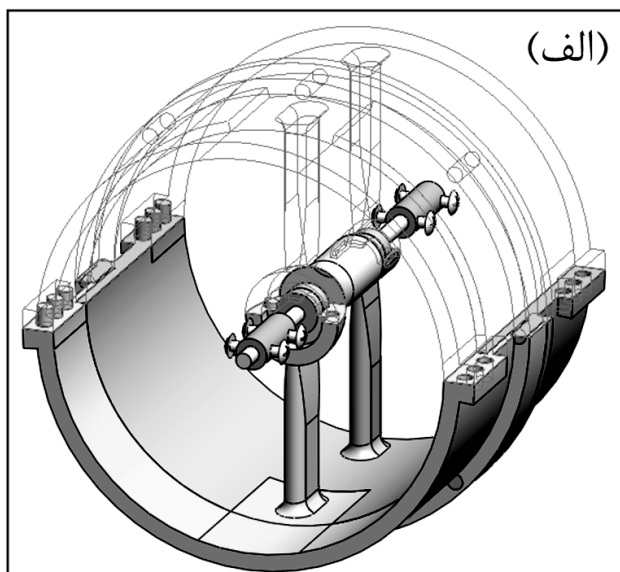


Fig. 4. a) CAD design of turbine body and its axis. b) Body components of wind turbine in half-open state

شکل ۴: الف) طرح کامپیوتری بدنه توربین و محور آن ب) اجزای بدنه توربین بادی در حالت نیمه باز

فاصله یک متری، بین فن تا لبه جلویی صفحه مسطح، گردابه‌های جریان آشفته به سطح زمین برخورد می‌کنند. نوسانات جریان باد تا فاصله یک متر از فن شدید است. پس از نصب و آماده سازی بستر آزمایش، میدان سرعت محوری جریان باد در ناحیه جلوی فن محوری به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. داده‌های مربوط به اندازه‌گیری میدان سرعت جریان باد در جدول

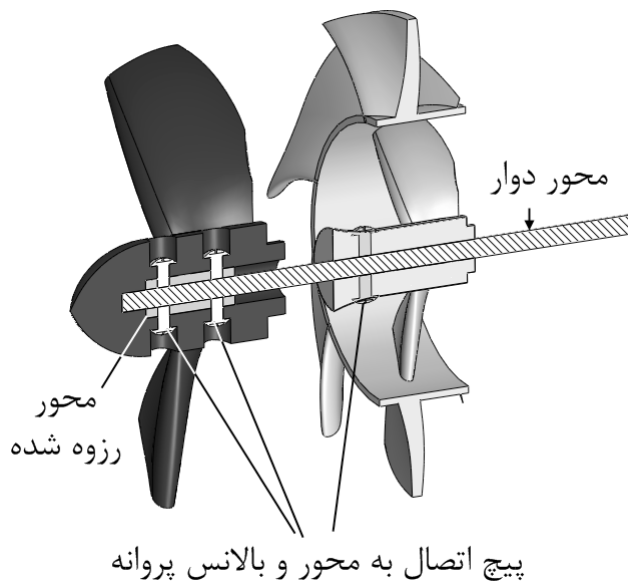


Fig. 3. Configuration of propeller connection to central axis

شکل ۳: ساختار اتصال پروانه به محور مرکزی

یک جدار استوانه‌ای شکل و جدار استوانه‌ای از ترکیب دو جدار جلویی و دو جدار پشتی تشکیل شده است. جدارهای بدنه توسط پین‌های بین جدار به هم متصل شدند.

۴-۲- تجهیز توربین بادی

توربین بادی کوچک (شکل ۵ الف)) شامل اجزای الکتریکی و مکانیکی است که نقش مهمی در آزمایش‌های طراحی شده دارند. یک دینام روی بدنه توربین بادی نصب شده تا توان مکانیکی توربین بادی را به جریان برق قابل اندازه‌گیری تبدیل کند (شکل ۵ ب)).

مطابق شکل ۵ پ)، یک ترمز مکانیکی برای توربین بادی طراحی شده تا گشتاور محور توسط آن تنظیم شود. ترمز مکانیکی شامل بدنه ترمز، پیچ تنظیم، فنر باز گرداننده و یک حلقه فلزی از جنس آلیاژ برنز است که توسط یک یاتاقان در موقعیت مشخصی از محور توربین مهار می‌شود. شعاع انحنا حلقه برنزی به مقدار بسیار جزئی بیشتر از شعاع انحنا محور دوار است. نقش حلقه فلزی ایجاد گشتاور اصطکاکی با دقت بسیار بالا است. روی محور روتور دو وزنه آهنربایی متقارن نصب شده است. سرعت دورانی روتور توربین با استفاده از سنسور اثر هال و تقویت کننده پالس الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود.

۵- آماده‌سازی بستر آزمایش در جریان باد پر سرعت

بستر آزمایش شامل یک صفحه مسطح است که به فاصله ۸ سانتی‌متر از سطح زمین قرار دارد. صفحه مسطح دارای عرض ۱/۵ متر، طول ۳ متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر است. از یک فن محوری برای تولید جریان باد استفاده شده است. فاصله لبه جلویی صفحه مسطح از فن محوری یک متر است. با این روش یک لایه مرزی از لبه جلویی صفحه مسطح تشکیل می‌شود. در

۵-۱- فن محوری برای تولید جریان باد

از یک فن بزرگ با سرعت دورانی ۱۴۸۰ دور بر دقیقه برای تولید جریان باد استفاده شده است. حداکثر سرعت جریان باد در جلوی فن ۲۲ متر بر ثانیه است. سرعت جریان باد به کمک صفحات تخت بزرگ تا چهل متر بر ثانیه افزایش یافته است. فن محوری در زمان کارکرد ضربات شدیدی به سیال وارد می‌کند و در اثر برخورد گردابه‌ها به پره‌های تیغه‌ای شکل فن، صدای زیادی در محیط ایجاد می‌شود. فن با ایجاد یک میدان جریان باد و تقریباً یکنواخت در راستای محور خود، شرایط لازم برای آزمایش توربین بادی و روتور آن را ایجاد می‌کند.

۵-۲- اندازه‌گیری تجربی میدان سرعت محوری جریان باد در جلوی فن محوری

در شکل ۶ نقاطی از فضا مشخص شدند که سرعت میدان جریان باد در آن‌ها اندازه‌گیری شده است. در هر مقطع عرضی شش نقطه روی دایره‌ای با شعاع ۱۸ سانتی‌متر (جایی که سرعت جریان بیشتر است) تعریف شده است. یک نقطه در مرکز دایره تعریف شده که بر محور فن منطبق است. تمام صفحات عرضی عمود بر محور فن هستند.

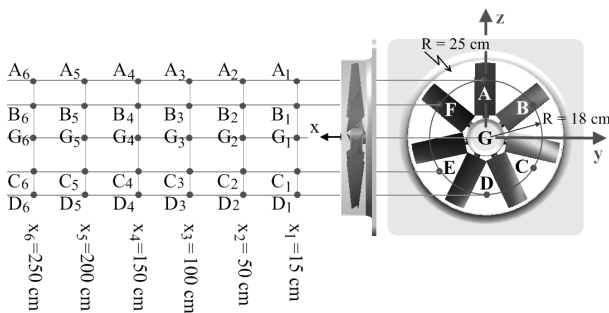


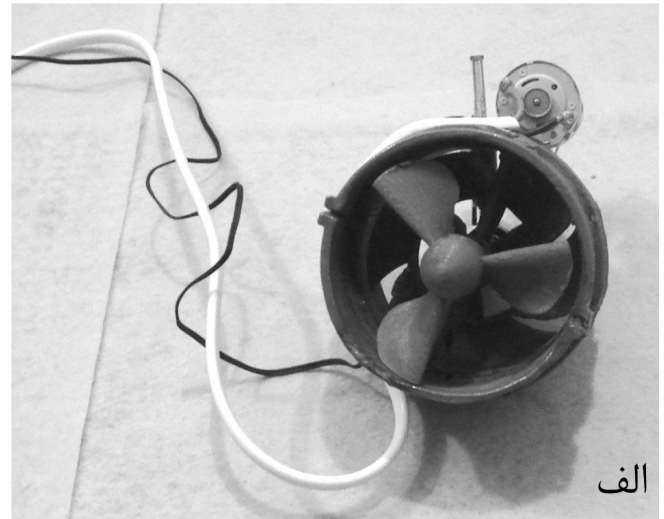
Fig. 6. Definition of points in space for measuring axial velocity of wind flow in front of axial fan

شکل ۶: تعریف نقاط در فضا برای اندازه‌گیری سرعت محوری جریان باد در جلوی فن محوری

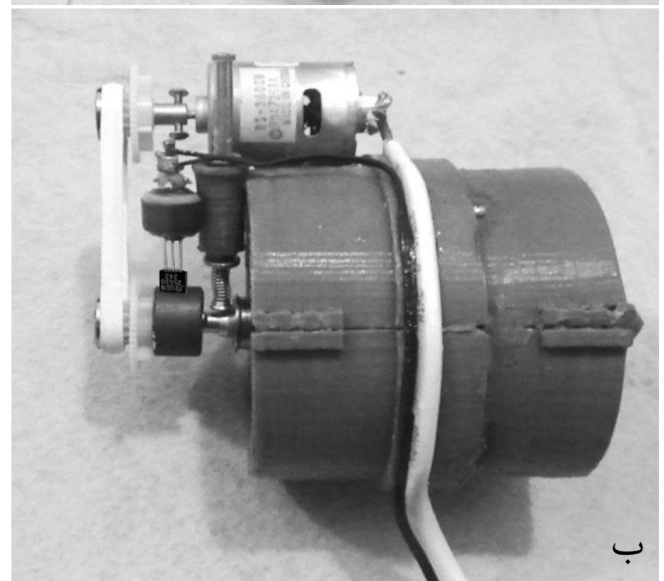
متوسط زمانی سرعت محوری جریان در شکل ۷ رسم شده است. متوسط زمانی سرعت محوری جریان در مقاطعی که از فن بیش از یک متر فاصله دارند، نسبتاً یکنواخت است. بیشترین و کمترین سرعت محوری جریان باد در مقاطع عرضی (که در شکل ۶ معرفی شد)، در جدول ۱ گردآوری شده است. سرعت محوری جریان در هر مکان نوسان دارد.

۶- آزمایش‌های روتور محوری و توربین بادی در جریان باد

آزمایش‌های توربین بادی در جریان خارجی باد در یک راهروی باز به عرض ۵ متر (در فضای آزمایشگاه) انجام شده است. بدین صورت که ابتدا روتور توربین بادی آزمایش شده و پس از آن توربین بادی با داکت استوانه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است.



الف



ب



پ

Fig. 5. a) Frontal view of small wind turbine. b) Electrical and mechanical components of wind turbine. c) Installation of mechanical brake and magnet

شکل ۵: الف) نمای روبروی توربین بادی کوچک ب) اجزای الکتریکی و مکانیکی توربین بادی. پ) نصب ترمز مکانیکی و آهنربا

۱ گردآوری شدند. سرعت لحظه‌ای جریان باد توسط سرعت‌سنج پروانه‌ای با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه ثبت شده است.

جدول ۱: نتایج اندازه‌گیری سرعت محوری جریان باد در جلوی فن محوری

Table 1. Results of measuring axial velocity of wind flow in front of axial fan

مقطع شماره ۱ ($x=15\text{ cm}$)							
G	F	E	D	C	B	A	نقاط
۱۷/۸	۱۵/۴	۱۹/۹	۱۵/۴	۱۷/۸	۱۷/۸	۱۹/۹	سرعت حداقل (m/sec)
۲۱/۹	۱۹/۹	۲۱/۹	۲۱/۹	۲۱/۹	۲۱/۹	۲۳/۶	سرعت متوسط (m/sec)
۲۸/۲	۲۱/۹	۲۳/۶	۳۰/۹	۲۸/۲	۲۵/۲	۲۹/۶	سرعت حداکثر (m/sec)
مقطع شماره ۲ ($x=50\text{ cm}$)							
G	F	E	D	C	B	A	نقاط
۱۲/۶	۱۲/۶	۲۱/۹	۱۷/۸	۱۲/۶	۸/۹	۸/۹	سرعت حداقل (m/sec)
۱۶/۹	۱۷/۸	۳۲/۵	۲۱/۹	۱۷/۸	۱۵/۴	۱۹/۹	سرعت متوسط (m/sec)
۲۱/۹	۲۸/۲	۲۳/۶	۲۵/۲	۲۱/۹	۱۷/۸	۲۸/۲	سرعت حداکثر (m/sec)
مقطع شماره ۳ ($x=100\text{ cm}$)							
G	F	E	D	C	B	A	نقاط
۱۱/۳	۴/۰	۱۲/۶	۱۲/۶	۱۳/۸	۱۲/۶	۱۵/۴	سرعت حداقل (m/sec)
۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۷/۵	۱۵/۴	۱۷/۵	سرعت متوسط (m/sec)
۱۷/۸	۱۹/۹	۱۷/۸	۱۷/۵	۱۷/۸	۱۷/۸	۱۷/۸	سرعت حداکثر (m/sec)
مقطع شماره ۴ ($x=150\text{ cm}$)							
G	F	E	D	C	B	A	نقاط
۱۱/۳	۱۲/۰	۱۲/۰	۱۱/۳	۱۱/۳	۸/۹	۵/۶	سرعت حداقل (m/sec)
۱۲/۰	۱۲/۶	۱۲/۶	۱۲/۰	۱۲/۶	۱۰/۵	۸/۰	سرعت متوسط (m/sec)
۱۳/۲	۱۳/۸	۱۳/۸	۱۴/۴	۱۳/۲	۸/۵	۱۳/۲	سرعت حداکثر (m/sec)
مقطع شماره ۵ ($x=200\text{ cm}$)							
G	F	E	D	C	B	A	نقاط
.	۸/۰	۹/۷	۸/۹	۵/۶	.	.	سرعت حداقل (m/sec)
۶/۹	۹/۷	۱۱/۳	۱۱/۳	۹/۷	۸/۰	۸/۰	سرعت متوسط (m/sec)
۱۲/۶	۱۱/۳	۱۲/۰	۱۲/۶	۱۳/۲	۱۳/۸	۱۲/۰	سرعت حداکثر (m/sec)
مقطع شماره ۶ ($x=250\text{ cm}$)							
G	F	E	D	C	B	A	نقاط
۸/۰	۶/۹	۱۰/۵	۸/۰	۸/۰	۶/۹	۸/۰	سرعت حداقل (m/sec)
۸/۰	۱۰/۵	۱۱/۳	۸/۹	۸/۹	۸/۰	۸/۰	سرعت متوسط (m/sec)
۹/۷	۱۲/۶	۱۲/۰	۹/۷	۱۰/۵	۱۱/۳	۱۰/۵	سرعت حداکثر (m/sec)

برای اندازه‌گیری نیروی محوری وارد بر روتور توربین بادی استفاده شده است. نیروسنج پیش از انجام آزمایش برای اندازه‌گیری نیرو تنظیم شد. صفحه نمایش این نیروسنج نیرو را بر حسب کیلوگرم نشان می‌دهد. در این

۱-۶- آزمایش روتور توربین بادی در جریان باد مطابق شکل ۸ روتور توربین بادی در جریان باد پر سرعت آزمایش شد تا عیوب احتمالی (مانند باز شدن اتصالات شکننده که باعث ارتعاش در محور روتور می‌شود) بر طرف شود. در این آزمایش از نیروسنج نوع اس

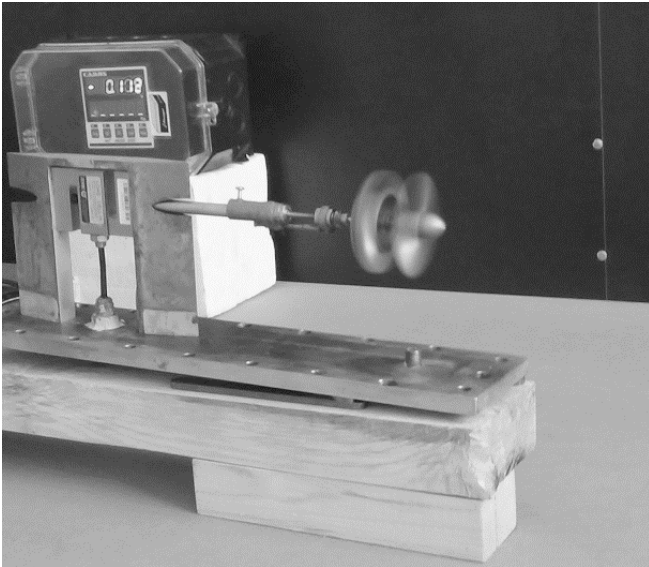


Fig. 8. Experiment of rotor of wind turbine in the wind flow

شکل ۸: آزمایش روتور توربین بادی در جریان باد

جدول ۲: ابزارهای اندازه‌گیری و دقت آنها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

Table 2. Measuring instruments and their precision in temperature of 25 centigrade degree

دقت	حداکثر	حداقل	واحد اندازه‌گیری	ابزار اندازه‌گیری
۰/۰۱ N	۲۵۰	۰/۰۱	N	نیروسنج
۰/۳ m/sec	۴۵	۰/۳	m/sec	سرعت سنج جریان
۱ mV	۲۰	۰	V	مولتی‌متر
۰/۰۰۱ mA	۲۵	۰/۰۰۱	mA	سنسور اثر هال
۰/۵ %	۱۰۰۰۰	۰	rpm	دور سنجی

مقاومت سازه توربین، روانی حرکت، عدم برخورد قطعات، کارکرد دقیق ترمز مکانیکی و صحت عملکرد مدار دینامو-موتور حاصل شده است. تصویر شکل ۹ کارکرد توربین بادی را در جریان باد نمایش می‌دهد.

۶-۲-۱- آزمایش تجهیزات مکانیکی و الکتریکی توربین بادی

تجهیزات مکانیکی و الکتریکی که روی توربین بادی نصب شدند به دقت بررسی شدند تا از صحت عملکرد این تجهیزات اطمینان حاصل شود. بررسی‌های انجام شده عبارتند از:

- بررسی چرخش روان روتور و عدم برخورد لبه‌های پروانه‌ها با جدار بدنه توربین.
- بررسی تحمل نیروی محوری توسط یاتاقان‌های روتور
- بررسی عدم برخورد پروانه‌ها با بازوهای نگه‌دارنده در اثر نیروی محوری.
- بررسی کارکرد صحیح ترمز مکانیکی و تنظیم گشتاور ترمزی محور توسط آن.

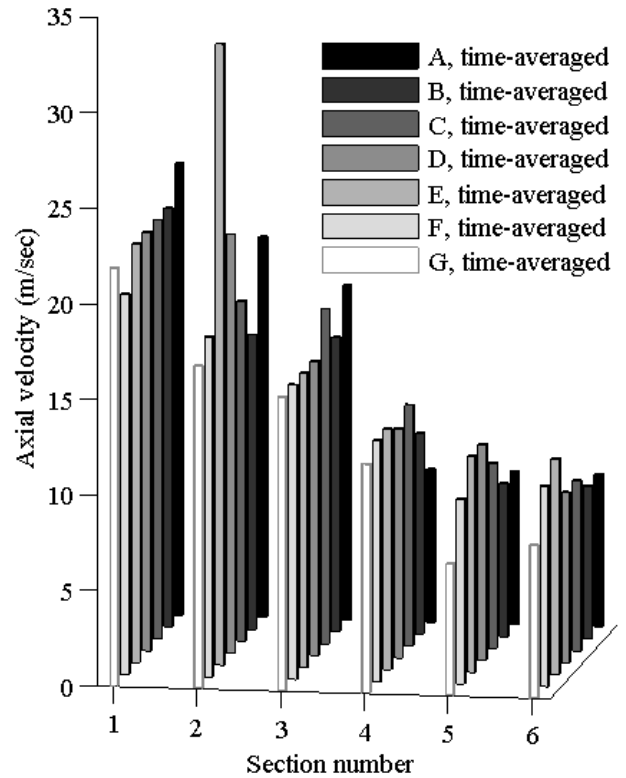


Fig. 7. Experimental results of measuring axial velocity of wind flow

شکل ۷: نتایج تجربی اندازه‌گیری سرعت محوری جریان باد. مقادیر متوسط زمانی سرعت محوری جریان باد ترسیم شدند.

آزمایش نهایت دقت به کار گرفته شده تا روتور و محور نیروسنج کاملاً هم‌راستا باشند.

۶-۱-۱- مشخصات نیروسنج

نیروسنج نوع اس که در آزمایش‌های جریان باد به کار رفته است، قادر به اندازه‌گیری نیرو از ۰/۰۱ تا ۲۵۰ نیوتن در حالت‌های کششی و فشاری است. دقت اندازه‌گیری این نوع نیروسنج ۰/۰۱ نیوتن است. دمای کارکرد نیروسنج از ۳۵ تا ۶۵ درجه سانتیگراد است جنس بدنه این نوع نیروسنج از فولاد ضد زنگ و درزهای آن برای کاربرد در آب کاملاً بسته شده است. کابل و بدنه نیروسنج کاملاً ضد آب است. کابل پوشش‌دار با چهار هادی جریان در نیروسنج به کار رفته است. ارتفاع نیروسنج ۷۶/۲ میلی‌متر، طول آن ۵۰/۸ میلی‌متر و پهنای بدنه آن ۱۲/۷ میلی‌متر است.

قبل از انجام آزمایش تنظیم نیروسنج با دقت انجام شده است. مطابق شکل ۸، نیرو سنج در یک ایرفویل عمودی جا داده شده تا نیروی پسای اضافی را کاهش دهد.

۶-۲- آزمایش توربین بادی در جریان باد

بخش مهمی از آزمایش توربین بادی، آزمایش تعیین مشخصه‌های کارکرد آن است. در آزمایش‌های انجام شده اطلاعات مهمی در مورد

$$T.S.R = \lambda = \frac{R_0 \omega}{U} \quad (3)$$

در ضریب توان بهینه حاصل ضرب گشتاور در سرعت روتور به حداکثر مقدار می‌رسد. در نسبت سرعت نوک ۰/۴، ضریب توان به مقدار بهینه رسیده است. بعد از نسبت سرعت نوک ۰/۴، گشتاور روتور توربین به تدریج کاهش می‌یابد تا در نسبت سرعت نوک ۰/۸ روتور بدون بار (بدون گشتاور) می‌شود و حداکثر سرعت دورانی را دارد. در نسبت سرعت نوک ۰/۸، ضریب توان روتور به صفر می‌رسد. در شکل ۱۰ پارامتر T_0 گشتاور ترمزی است و مقدار ثابت دارد.

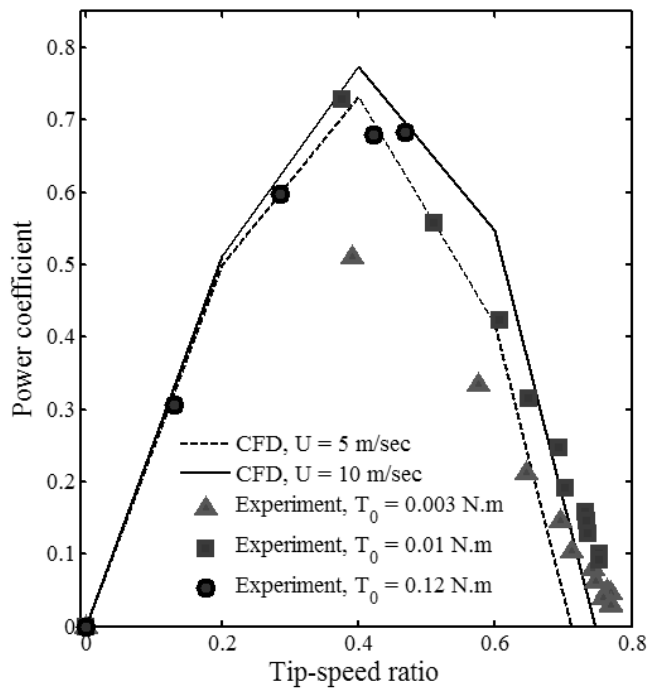


Fig. 10. Numerical and experimental results for power coefficient of wind turbine against tip-speed ratio

شکل ۱۰: نتایج عددی و تجربی برای ضریب توان توربین بادی در مقابل نسبت سرعت نوک

در شکل ۱۱ ضریب توان توربین بادی در مقابل ضریب سرعت القایی ترسیم شده است. مقادیر حل تحلیلی از معادلات ارائه شده در مراجع [۱۴] محاسبه شدند.

۷- مقایسه داده‌های تجربی با تئوری اندازه حرکت خطی با دو دیسک انتقال توان^۳

تئوری اندازه حرکت خطی با دو دیسک انتقال توان در سال ۱۹۸۳ توسط نیومن ارائه شد [۱۴]. این تئوری حداکثر ضریب توان روتور دو پروانه‌ای توربین بادی را به صورت تحلیلی بیان کرده است. شکل ۱۲ طرح کلی یک روتور محوری دو پروانه‌ای را نشان می‌دهد. هر پروانه توسط یک دیسک

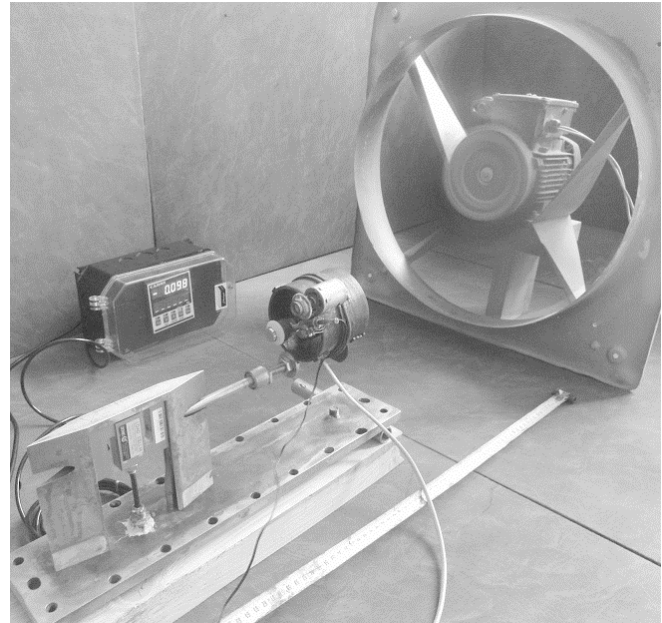


Fig. 9. Experiment of wind turbine in the wind flow

شکل ۹: آزمایش توربین بادی در جریان باد

• بررسی مدار دینامو-موتور و بررسی پالس‌های خروجی از سنسور اثر هال.

بر اساس دقتی که در مرحله طراحی و ساخت توربین بادی انجام شد، در تمام آزمایش‌ها حرکت روان و عدم برخورد لبه‌های پروانه با جدار داکت مشاهده شده است. توربین بادی قابلیت تحمل نیروی محوری جریان باد پر سرعت را در دو راستای جریان مستقیم و جریان معکوس نشان داده است. همچنین از عدم برخورد پروانه‌ها (که تحت تأثیر نیروی محوری جریان قرار دارند) با بازوهای نگه‌دارنده اطمینان حاصل شد.

با استفاده از ترمز مکانیکی تنظیم گشتاور ترمزی محور توربین بادی در سه مقدار ۰/۰۰۳، ۰/۰۱ و ۰/۱۲ نیوتن متر تنظیم شد. مدار الکتریکی (بسته) دینامو-موتور برای اندازه گیری دور توربین بادی آزمایش شد. ولتاژهای خروجی دینامو-موتور توسط مولتی متر ثبت شدند. ضرایب بدون بعد که کارکرد توربین بادی را در جریان باد مشخص می‌نمایند از داده‌های سرعت جریان، گشتاور ترمزی و ولتاژ دینامو-موتور (که توسط آن دور روتور تقریب زده شد) محاسبه شدند. در شکل ۱۰ منحنی‌های ضریب توان^۱ توربین بادی در مقابل نسبت سرعت نوک^۲ رسم شدند. در این ترسیم محدوده سرعت جریان باد از صفر تا چهار متر بر ثانیه است. نتایج آزمایش روتور توربین در هوا به طور بسیار نزدیکی با نتایج آزمایش توربین بادی (با جدار استوانه‌ای شکل) یکسان است.

ضریب توان روتور و نسبت سرعت نوک توسط معادلات (۲) و (۳) تعریف شدند.

$$C_p = \frac{\omega T_0}{0.5 \rho U^3 A_{th}} \quad (2)$$

- 1 Power coefficient
- 2 Tip-speed ratio

3 Linear momentum double actuator disc theory

$$C_p = \frac{F_1 u \alpha_2 + F_2 u \alpha_4}{0.5 \rho A_m U^3} \quad (4)$$

نیومن با استفاده از مشتق‌گیری نشان داد که ضریب توان در $u_2 = (4/5)u_1$ و $u_4 = (2/5)u_1$ به حداکثر مقدار می‌رسد [۱۴]. در این حالت بیشترین ضریب توان برابر $\frac{16}{45}$ برآورد شده است. بر این اساس یک توربین با دو دیسک انتقال توان حداکثر ضریب توان ۶۴ درصد دارد و می‌تواند به اندازه ۸٪ توان بیشتری نسبت به توربینی با یک دیسک انتقال (یا یک پروانه) جذب کند.

نتایج تجربی در مقاله حاضر حداکثر ضریب توان ۶۸ درصد را نشان داده است. نتایج تجربی ۴ درصد نسبت به تئوری دو دیسک انتقال توان اختلاف دارد. از این مقایسه مشخص است که پروانه‌های محوری بهینه‌سازی شده، بیشترین مقدار از انرژی جنبشی جریان باد را جذب کردند.

۸- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر یک توربین بادی کوچک با روش تجربی بررسی شد و دست‌یابی به ضریب توان بالاتر از ۶۸٪ را مشخص نمود. طراحی و ساخت این توربین بادی محوری با پروانه‌ها و اجزای بهینه‌سازی شده، یک نوآوری در صنعت توربین‌های بادی است. توربین بادی ابداع شده، برای مناطقی با جریان باد کم‌سرعت قابل استفاده است. ضریب توان روتور دو پروانه‌ای توربین بادی با تئوری دو دیسک انتقال توان (که بیشترین ضریب توان را در حد ۶۴ درصد اثبات نموده) هم‌خوانی دارد.

در طراحی هر قطعه ساخته شده از علوم مهندسی مکانیک در زمینه‌های تحلیل سیالاتی و جامداتی، طراحی اجزاء مکانیکی، دینامیک و ارتعاشات استفاده شده است. تکنیک‌های ساخت که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفتند برپایه اصول طراحی، بسیار موفق بودند. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده در مرحله ساخت عبارتند از:

- پیش‌بینی مشکلات ساخت و معایب احتمالی محصول کمک بسیار زیادی به موفق بودن ساخت اصلی نموده است. با در اختیار بودن یک قطعه یا محصول اولیه دقت (تولرانس) طراحی قطعات به درستی پیش‌بینی شدند.
- روش چاپ سه‌بعدی محصولات سبک و نسبتاً مقاوم را ایجاد نموده است. توربین‌های ساخته شده با پیش‌بینی حداکثر بار و ضریب اطمینان پس از اتمام آزمایش‌ها سالم مانده‌اند.
- مونتاژ قطعات که با روش چاپ سه‌بعدی تولید شده‌اند تنها با رعایت تولرانس طراحی امکان پذیر می‌شود. مونتاژ قطعات توربین بادی با تعداد بیش از بیست قطعه کوچک و بزرگ در عمل بسیار دشوار است. مدیریت زیرمجموعه‌های مونتاژ شده نقش بسیار مؤثری در مونتاژ کلی توربین داشته است.
- پیش‌چاپ پروانه در صفحه گذرا از دایره چرخش پروانه یک عامل مهم در عدم بالانس دینامیکی پروانه است. لذا در مراحل ساخت پروانه

- CFD, T.S.R = 0.2 --- Analytical, T.S.R = 0.2
- CFD, T.S.R = 0.4 --- Analytical, T.S.R = 0.4
- CFD, T.S.R = 0.6 --- Analytical, T.S.R = 0.6
- CFD, T.S.R = 0.8 --- Analytical, T.S.R = 0.8
- CFD, T.S.R = 1.0 --- Analytical, T.S.R = 1.0

× Experiment, $T_0 = 0.003 \text{ N.m}$

+ Experiment, $T_0 = 0.01 \text{ N.m}$

× Experiment, $T_0 = 0.12 \text{ N.m}$

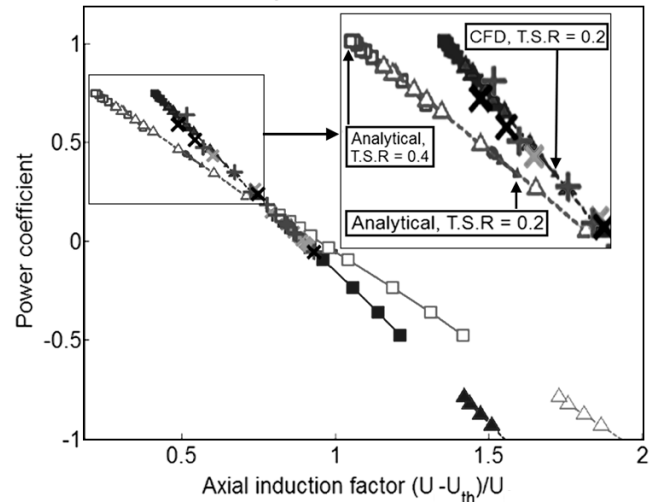


Fig. 11. Results of numerical solution, analytical solution and experimental data for power coefficient against axial induction factor of wind turbine

شکل ۱۱: نتایج حل عددی، حل تحلیلی و نتایج تجربی برای ضریب توان در مقابل ضریب سرعت القایی توربین بادی

انتقال توان معرفی شده است. بخش زیادی از حجم سیالی که از دیسک اول عبور می‌کند از دیسک دوم هم عبور می‌کند. معادله اندازه‌حرکت مستقیماً برای ناحیه مرکزی جریان و برای جریان انشعابی به کار رفته است. در شکل ۱۲ نیروی فشاری وارد بر هر دیسک نمایش داده شده‌اند. سرعت جریان با ضریب سرعت القایی توربین مشخص شده است.

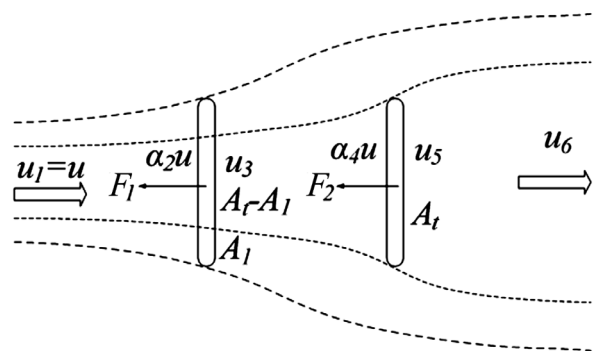


Fig. 12. Flow velocity and thrust in linear momentum double-actuator-disc theory

شکل ۱۲: سرعت جریان و نیروی فشاری در تئوری اندازه‌حرکت خطی با دو دیسک انتقال توان [۱۳]

بر اساس تئوری اندازه‌حرکت خطی با دو دیسک انتقال توان ضریب توان روتور با دو پروانه محوری برابر است با:

زاویه حمله ایده‌آل	α_0
زاویه حمله بهینه	α_{opt}
زاویه ورود جریان به ایرفویل	β
نسبت سرعت نوک $\lambda=R_0\omega/u_0$	λ
دانسیته سیال (kg/m^3)	ρ
سرعت زاویه‌ای روتور (rad/sec)	ω
سرعت زاویه‌ای روتور در گشتاور صفر (rad/sec)	ω^*
بالانویس‌ها	
چرخش در گشتاور صفر یا بدون بار	*
زیرنویس‌ها	
مشخصه جریان در گلوگاه داکت	th

منابع

- [1] B. Blocken, 50 years of computational wind engineering: past, present and future, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 129 (2014) 69-102.
- [2] S.Z. Roshan, S. Alimirzazadeh, M. Rad, RANS simulations of the stepped duct effect on the performance of ducted wind turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145 (2015) 270-279.
- [3] A. Lotfi, M. Rad, Drag performance of divergent tubular-truncated cones: a shape optimization study, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9 (2012) 105-112.
- [4] Y. Niknafs Abrebekooaha, M. Rad, Experimental and numerical investigation of drag force over tubular frustum, *Scientia Iranica; International Journal of Science and Technology*, 18(5) (2011)1133-1137.
- [5] A. Zahedi Nejad, M. Rad, M. Khayyat, Conceptual duct shape design for horizontal axis hydro-kinetic turbines, *Scientia Iranica; International Journal of Science and Technology, Transactions B: Mechanical engineering*, 23(5)(2015) 2113-2124.
- [6] X. Li, K. Yang, J. Bai, J. Xu, A new optimization method to improve the overall performance of thick wind turbine airfoils, *Energy*. 116 Part 1 (2016) 202-213.
- [7] R. Belamadi, A Djemili, A. Ilinca, R. Mdouki, Aerodynamic performance analysis of slotted airfoils for application to wind turbine blades, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 151 (2016) 79-99.
- [8] A. Hassanzadeh, A. Hassanzadeh-Hassanabadi, A. Dadvand, Aerodynamic shape optimization and analysis of a small wind turbine blades employing the Viterna

لازم است نهایت دقت برای جلوگیری از پیچش پروانه به کار رود.

- برای پروانه سبک هم‌مرکز بودن و هم‌راستا بودن محور یاتاقان‌های روتور و محور پروانه‌ها با محور مرکزی، عامل مهمی در بالانس بودن روتور محسوب می‌شود. هم‌راستا بودن محور مانع از به وجود آمدن نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاه نوسانی در راستای عمود بر پروانه می‌شود و از بروز گشتاور ترمزی ناخواسته جلوگیری می‌شود.

مهم‌ترین نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جریان باد عبارتند از:

- در آزمایش توربین بادی در جریان باد، مقاومت سازه روتور، روانی حرکت و عدم برخورد قطعات بررسی شده است و از عملکرد مناسب توربین بادی اطمینان حاصل شده است.
- توربین بادی قابلیت تحمل نیروی محوری جریان باد پرسرعت را در دو راستای جریان مستقیم و جریان معکوس نشان داده است.
- در آزمایش توربین بادی کارکرد صحیح ترمز مکانیکی برای ایجاد گشتاور ثابت بررسی شده است. در تمام آزمایش‌ها ترمز مکانیکی توانسته است گشتاور یکنواخت را روی محور روتور توربین بادی ایجاد کند.
- بر اساس نتایج آزمایش‌ها ضریب توان توربین بادی در نسبت سرعت نوک 0.4 به 6.8 درصد رسیده است. بر این اساس حداقل 13 درصد افزایش جذب توان نسبت به بهترین توربین‌های بادی محوری سه پره‌ای حاصل شده است.

فهرست علائم

ضریب پسای کل	C_D
ضریب پسای اصطکاکی	$C_{D,f}$
ضریب پسای فشاری	$C_{D,p}$
ضریب پسای کل	$C_{D,tot}$
ضریب توان توربین	C_p
نیروی پسا (N)	F
فشار استاتیک (Pa)	p
مختصات شعاعی برای هر پروانه (m)	r
شعاع پروانه توربین (m)	R_0
گشتاور ترمزی محور توربین (N.m)	T_0
سرعت جریان در گلوگاه داکت در شرایط بدون بار (m/s)	u_2^*
سرعت جریان آزاد (m/s)	U
میانگین سطحی سرعت جریان در یک مقطع (m/s)	u

علائم یونانی

ضریب سرعت القایی	α
------------------	----------

- industrial aerodynamics*, 158 (2016) 11-25.
- [12] Q. Li, J. Murata, M. Endo, T. Maeda, Y. Kamada, Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a horizontal axis wind turbine (part II: wake characteristics), *Energy*, 113(15) (2016) 1304-1315.
- [13] A. Zahedi Nejad, M. Rad, M. Khayat, Numerical and experimental investigations for design of a high performance micro-hydro-kinetic turbine, *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 30(5) (2017) 785-790.
- [14] B. G. Newman, Multiple actuator-disc theory for wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 24(3) (1986) 215-225.
- approach for post-stall region, *Alexandria engineering journal*, 55(3) (2016) 2035-2043.
- [9] C. J. Bai, W. C. Wang, Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs), *Renewable and sustainable energy reviews*, 63 (2016) 506-519.
- [10] M. H. Giasi, A. Jafarian Dehkordi, Investigating the influence of dimensional scaling on aerodynamic characteristics of wind turbine using CFD simulation, *Renewable energy*, 97 (2016) 162-168.
- [11] L. Wang, R. Quant, A. Kolios, Fluid structure interaction modelling of horizontal-axis wind turbine blades based on CFD and FEA, *Journal of wind engineering and*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Rad and A. Zahedi Nejad, Fabrication and Test of an Axial Wind Turbine with the Most Power During Absorbing Flow Kinetic Energy, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 913-923.
DOI: 10.22060/mej.2017.12269.5299

